УДК 68-83-52

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СИММЕТРИЧНОМУ ОПТИМУМУ

Н.В. Кояин, О.П. Мальцева, Л.С. Удут

Томский политехнический университет
E-mail: epatpu@mail2000.ru

Рассмотрен симметричный оптимум настройки контуров регулирования систем электропривода, систематизированы качественные показатели при отработке управляющих и возмущающих воздействий. Выполнен анализ влияния числа и соотношения малых постоянных времени в прямом канале регулирования на показатели работы оптимизированного контура.

В работе [1] проанализированы модульный (МО) и линейный (ЛО) оптимумы настройки типовых контуров регулирования систем электропривода, систематизированы и дополнены качественные показатели. Целью данной статьи является рассмотрение симметричного оптимума (СО).

Симметричный оптимум настройки контура

Простейший оптимизированный по СО контур характеризуется наличием двух интегрирующих звеньев, представляет собой систему третьего порядка и имеет следующие стандартные передаточные функции контура [2]:

– разомкнутого

$$W(p)_{\text{раз}} = \frac{4T_\mu p+1}{8T_\mu^2 p^2 (T_\mu p+1)};$$

– замкнутого по управлению

$$W(p)_{\text{у.зам}} = \frac{1}{k_{\text{оу}}} \frac{(4T_\mu p+1)}{8T_\mu^3 p^3 + 8T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p+1};$$

– замкнутого по возмущению

$$W(p)_{\text{в.зам}} = \frac{W'_{\text{об}}(p) 8T_\mu^2 p^2 (T_\mu p+1)}{8T_\mu^3 p^3 + 8T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p+1}, \qquad (1)$$

где T_μ – малая постоянная времени контура; p – оператор дифференцирования; $k_{\text{оу}}$ – коэффициент обратной связи; $W'_{\text{об}}(p)$ – передаточная функция части объекта управления, входящей в прямой канал отработки возмущающего воздействия.

Реакция оптимизированного по СО контура на скачок управляющего воздействия характеризуется значительным перерегулированием, величину которого можно уменьшить, установив в канале задания на входе контура фильтр с передаточной функцией

$$W(p)_{\text{ф.вх}} = \frac{1}{T_{\text{ф.вх2}}\, p+1}. \qquad (2)$$

При выборе постоянной времени фильтра

$$T_{\text{ф.вх2}} = 4T_\mu \qquad (3)$$

передаточная функция контура по управлению принимает вид

$$W(p)_{\text{у.зам}} = \frac{1}{k_{\text{оу}}} \frac{1}{8T_\mu^3 p^3 + 8T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p+1},$$

что соответствует оптимизации по МО контура третьего порядка.

Вид полинома и значения коэффициентов числителя передаточной функции (1) определяются составом и параметрами звеньев объекта управления, к входу которых приложено возмущающее воздействие. Поэтому частотные и переходные характеристики контура по возмущению зависят от параметров объекта управления.

Строго говоря, по СО может быть оптимизирован только контур, объект управления которого содержит в своем составе интегрирующее звено [1].

Оптимизация по СО контура с интегрирующим звеном

Для настройки контура с интегрирующим звеном на СО в общем случае выбирается пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД)-регулятор с передаточной функцией

$$W_{\text{рег}}(p) = k_{\text{рег}} \frac{(T_{\text{из}} p+1)(T_{\text{уп}} p+1)}{T_{\text{из}}\, p},$$

где

$$k_{\text{рег}} = \frac{T_1}{k_1 k_2 k_{\text{оу}}\, a T_\mu} \qquad (4)$$

– коэффициент усиления регулятора;

$$T_{\text{из}} = T_{\text{рег}} = a b T_\mu \qquad (5)$$

– постоянная времени изодрома (регулятора), с;

$$T_{\text{уп}} = T_2$$

– постоянная времени упреждения, с;

– a=b=2 – коэффициенты оптимизации контура по СО.

Если T_2=0, то применяется пропорционально-интегральный регулятор [1], параметры которого определяются по выражениям (4) и (5).

Частотные и переходные характеристики по управлению и возмущению z_3 оптимизированного по СО контура в сравнении с другими настройками приведены в [1].

Полоса пропускания замкнутого контура без фильтра на входе:

– по модулю

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0{,}85}{T_\mu}, \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– по фазе

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0{,}59}{T_\mu}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Благодаря наличию в оптимизированном контуре регулирования двух интегрирующих звеньев он является астатической системой второго порядка по управлению и первого по возмущению. Это обеспечивает отсутствие скоростной ошибки контура: $\Delta y_{\text{у.ск}}=0$, и установившихся ошибок по управлению и возмущению вне зависимости от места его приложения: $\Delta y_{\text{у.уст}}=0$, $\Delta y_{\text{в.уст}}=0$.

Быстродействие контура при отработке управляющих и возмущающих воздействий выше, чем при оптимизации по МО. Время переходного процесса определяется только значением малой постоянной времени T_μ и не зависит от ее соотношения с постоянной интегрирования T_0. Величина же максимальной ошибки по возмущению зависит от отношения T_0/T_μ.

Контур с интегрирующим звеном, оптимизированный по СО, обеспечивает следующие показатели отработки ступенчатых управляющих воздействий:

– перерегулирование

$$\sigma = 43{,}4\,\%;$$

– время первого вхождения в 5 % зону, с,

$$t_{\text{ру1}}^{(5)} = 2{,}9T_\mu;$$

– время переходного процесса, с,

$$t_{\text{ру2}}^{(5)} = 14{,}7T_\mu,$$

и ступенчатых возмущающих воздействий z_3:

– максимальная динамическая ошибка

$$\Delta y_{\text{в.макс}} = 1{,}77\, k_3 \frac{T_\mu}{T_0} \Delta z_3;$$

– время отработки, с

$$t_{\text{рв}} = 12{,}35T_\mu.$$

В результате установки фильтра вида (2) с постоянной времени (3) контур по управлению остается астатической системой, но уже первого порядка. Установившаяся ошибка по управлению остается равной нулю: $\Delta y_{\text{у.уст}}=0$, но появляется скоростная ошибка

$$\Delta y_{\text{у.ск}} = \frac{4T_\mu}{k_{\text{оу}}} \left(\frac{dx}{dt}\right)_{\text{зад}} = 4T_\mu \left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{зад}}.$$

Оптимизированный замкнутый контур с входным фильтром вида (2) и постоянной времени (3) имеет полосу пропускания:

– по модулю

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0{,}5}{T_\mu}, \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– по фазе

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0{,}35}{T_\mu}, \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

и обеспечивает следующие показатели отработки ступенчатых управляющих воздействий:

– перерегулирование

$$\sigma = 8{,}1\,\%;$$

– время первого вхождения в 5 % зону, с,

$$t_{\text{ру1}}^{(5)} = 7{,}0T_\mu;$$

– время переходного процесса, с,

$$t_{\text{ру2}}^{(5)} = 12{,}0T_\mu.$$

Быстродействие контура с фильтром (2) на входе по управлению оказывается ниже по сравнению с оптимизацией по МО. По возмущению контур сохраняет показатели качества работы неизменными. Частотные и переходные характеристики по управлению и возмущению оптимизированного по СО контура с фильтром на входе в сравнении с другими настройками приведены в [1].

Для сравнения работы контуров, оптимизированных по разным критериям, показатели качества сведены в таблицу.

Таблица. *Показатели качества работы оптимизированных контуров (в скобках – номера формул)*

σ, %	$t_{\text{ру1}}^{(5)}$, с	$t_{\text{ру2}}^{(5)}$, с	$\Delta y_{\text{у.уст}}$	$\Delta y_{\text{ск}}$	$\Delta y_{\text{в.уст}}$	для z_3		$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$
						$\Delta y_{\text{в.макс}}$	$t_{\text{рв}}$, с		
Модульный оптимум									
Контур с инерционными звеньями									
4,3	$4{,}1T_\mu$	$4{,}1T_\mu$	0	(13) [1]	0	Рис. 6, (16) [1]	Рис. 6, (15) [1]	$\frac{0{,}71}{T_\mu}$	$\frac{0{,}71}{T_\mu}$
Контур с интегрирующим звеном									
4,3	$4{,}1T_\mu$	$4{,}1T_\mu$	0	(13) [1]	(17) [1]	(18) [1]	$2{,}45T_\mu$	$\frac{0{,}71}{T_\mu}$	$\frac{0{,}71}{T_\mu}$
Линейный оптимум									
Контур с инерционными звеньями									
0	$9{,}5T_\mu$	$9{,}5T_\mu$	0	(19) [1]	0	Рис. 6, (21) [1]	Рис. 6, (20), [1]	$\frac{0{,}33}{T_\mu}$	$\frac{0{,}51}{T_\mu}$
Контур с интегрирующим звеном									
0	$9{,}5T_\mu$	$9{,}5T_\mu$	0	(19) [1]	(22) [1]	(23) [1]	$6{,}53T_\mu$	$\frac{0{,}33}{T_\mu}$	$\frac{0{,}51}{T_\mu}$
Симметричный оптимум (контур с интегрирующим звеном)									
без фильтра на входе контура									
43,4	$2{,}9T_\mu$	$14{,}7T_\mu$	0	0	0	(6)	$12{,}35T_\mu$	$\frac{0{,}85}{T_\mu}$	$\frac{0{,}59}{T_\mu}$
с фильтром на входе контура									
8,1	$7T_\mu$	$12T_\mu$	0	(7)	0	(6)	$12{,}35T_\mu$	$\frac{0{,}5}{T_\mu}$	$\frac{0{,}36}{T_\mu}$

Влияние числа и соотношения малых постоянных времени в прямом канале регулирования на показатели работы оптимизированного контура

Используя условия оптимизации типовых контуров по МО и СО, а также значения ожидаемых показателей качества их работы, оценим достоверность общепринятого в классической теории оптимизации определения эквивалентной малой постоянной времени контура

$$T_\mu = \sum_{i=1}^{n} T_{\mu i}, \qquad (6)$$

где $T_{\mu i}$ – малые постоянные времени инерционных звеньев первого порядка, включенных последовательно в прямом канале контура регулирования.

Выявим влияние числа n и соотношения постоянных времени $T_{\mu i}$ на фактические показатели качества работы контура, оптимизированного по МО или СО при выбранном значении эквивалентной малой постоянной времени согласно (6). В качестве иллюстрации на рис. 1 и 2 приведены зависимости фактических показателей качества работы контуров, оптимизированных с учетом (6) по МО [1] и СО с фильтром на входе, соответственно от отношения $\frac{T_{\mu 2}}{T_{\mu 1}+T_{\mu 2}}$ при двух инерционных звеньях и от числа n инерционных звеньев с равными по величине постоянными времени $T_{\mu 1}=T_{\mu 2}=...=T_{\mu n}$. Приведенные зависимости соответствуют отношению $\frac{T_1}{\Sigma T_{\mu i}}=4$ в контуре с инерционными звеньями и $\frac{T_0}{\Sigma T_{\mu i}}=4$ в контуре с интегрирующим звеном в прямом канале.

При равенстве малых постоянных времени имеют место максимальные отклонения фактических показателей качества работы оптимизированных контуров от ожидаемых. Величина отклонения зависит от числа инерционных звеньев с малыми постоянными времени в прямом канале (рис. 2).

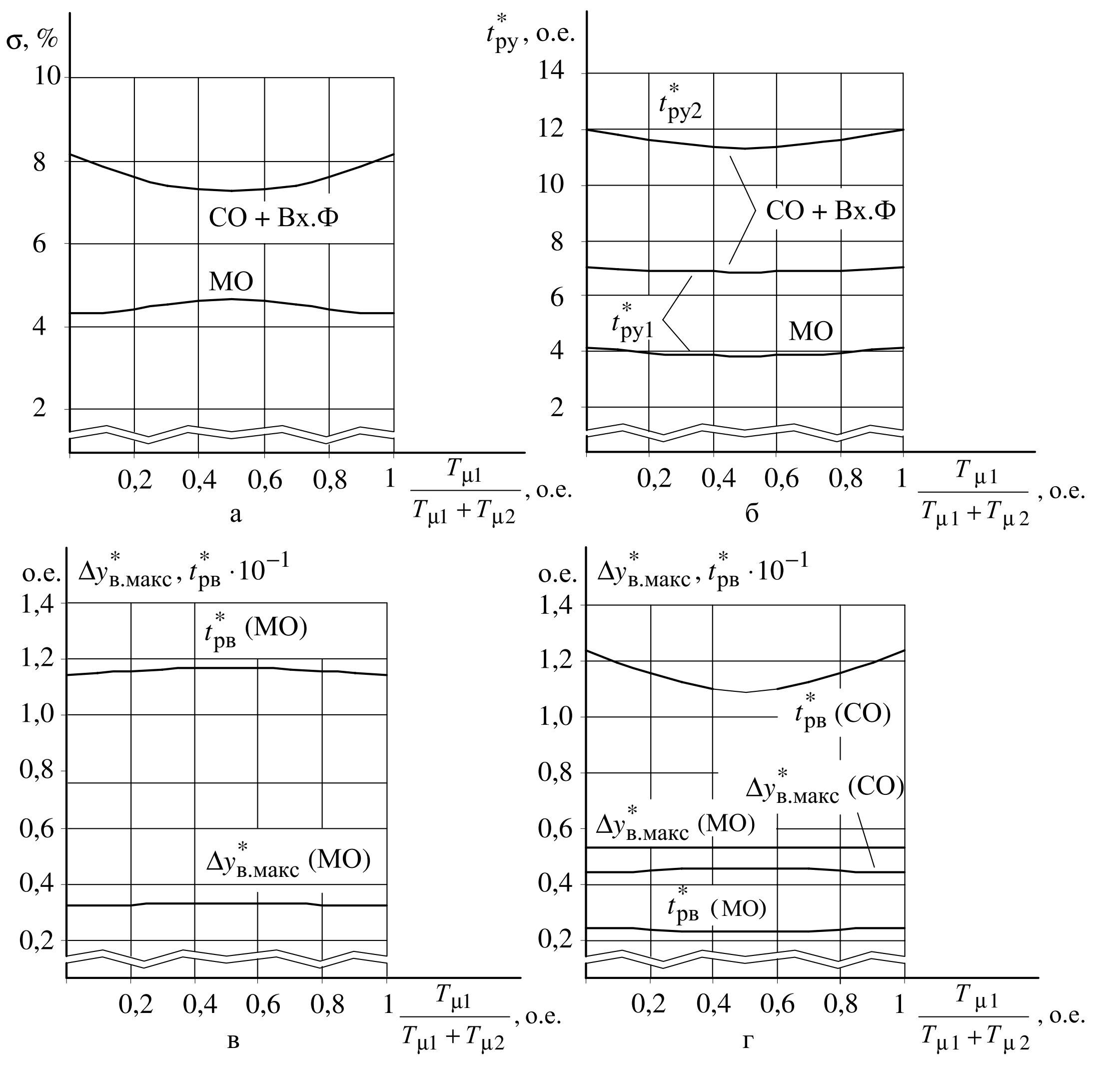
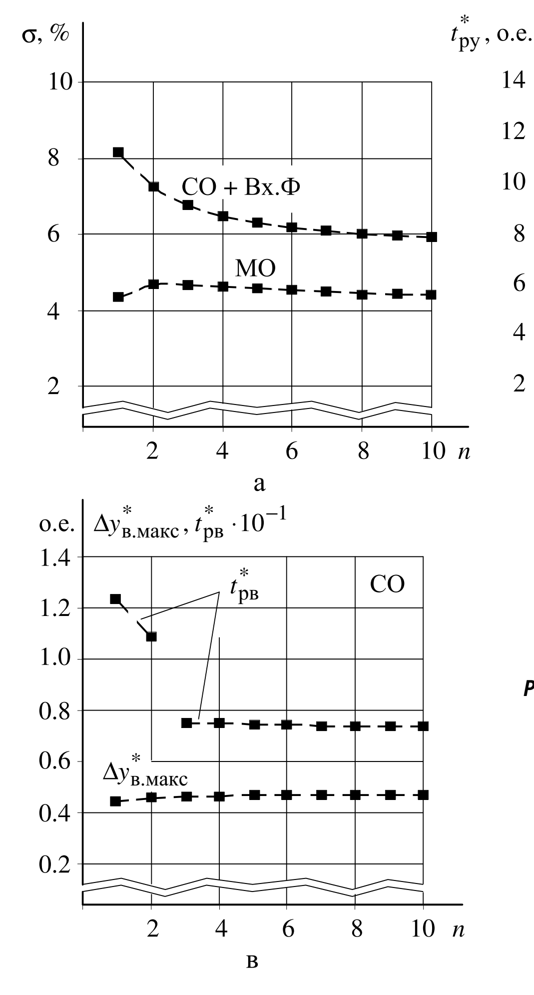


Рис. 1. *Зависимости показателей качества отработки оптимизированным контуром ступенчатого управляющего и возмущающего z_3 воздействия от соотношения двух малых постоянных времени в прямом канале контура контура: а), б) и г) с интегрирующим звеном; в) с инерционными звеньями*



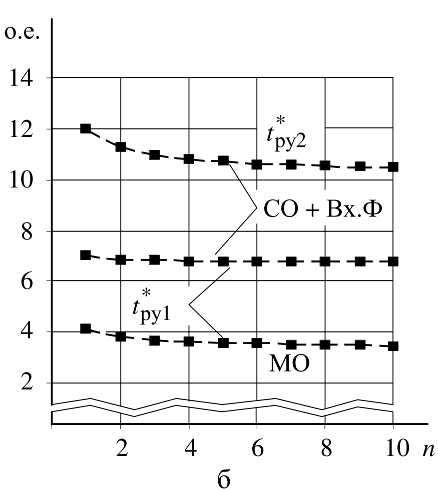


Рис. 2. *Зависимость показателей качества работы оптимизированного контура от числа n последовательно включенных в прямом канале инерционных звеньев первого порядка с малыми постоянными времени: а) $\sigma=f(n)$; б) $t^{*}_{\text{ру}}=f(n)$; в) $\Delta y_{\text{в.макс}}=f(n)$, $t^{*}_{\text{ру}}=f(n)$*

Заключение

Контур с интегрирующим звеном в прямом канале при оптимизации по симметричному оптимуму без фильтра на входе обладает по сравнению с настройкой на модульный оптимум более высокими динамическими характеристиками и по управлению, и по возмущению. Он обеспечивает отсутствие статических ошибок по управлению и возмущению, а также нулевую скоростную ошибку по управлению. Недостатком такой настройки является большое перерегулирование при отработке ступенчатых управляющих воздействий. При установке на входе оптимизированного по симметричному оптимуму контура сглаживающего фильтра он теряет свои преимущества в сравнении с настройкой на модульный оптимум по управлению, но сохраняет по возмущению.

Точная оптимизация контура регулирования по модульному или симметричному оптимуму возможна при наличии только одного инерционного звена с малой постоянной времени в прямом канале. Поэтому принятое в классической теории оптимизации определение эквивалентной малой постоянной времени позволяет осуществлять только приближенную настройку по модульному или симметричному оптимуму. При нескольких малых инерционностях в прямом канале контура значение эквивалентной малой постоянной времени, обеспечивающей точную настройку, не может быть найдено. Фактические показатели качества работы оптимизированного контура зависят и от числа инерционных звеньев, и от соотношения численных значений их малых постоянных времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кояин Н.В., Мальцева О.П., Удут Л.С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 120–125.
2. Kessler C. Das symmetrische Optimum. Teil I und III // Regelungstechnik. – 1958. – B. 6. – H. 11. – S. 395–400; H. 12. – S. 432–436.